

LA MACCHINA A VAPORE ELEMENTO DI SVILUPPO NEL SETTORE CSP-ORC

Amedeo Amoresano

Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII)
Scuola Politecnica e delle Scienze di Base “Federico II” Napoli
Via Claudio, 21 – 80125 Rome, Napoli
www.dii.unina.it - Tel. +39 0817683273 - amedeo.amoresano@unina.it

Sommario

La tecnologia CSP fornisce attualmente risposte non sempre ottimali nell'accoppiamento con sistemi ORC. Ciò deriva da limiti tecnologici che si sono via via presentati e susseguiti nel corso degli anni (ad esempio la messa al bando dei fluidi frigorigeni clorati). Queste considerazioni hanno indirizzato la ricerca nel settore dei sistemi binari verso qualcosa di già noto, di notevole interesse scientifico ma anche storico e culturale che consiste nello sviluppo di macchine alternative a vapore di nuova generazione. L'analisi storica delle macchine a vapore ha permesso di valutare come un sistema che è stato artefice della rivoluzione industriale possa essere riproposto su nuove basi tecnologiche e fornire un importante punto di partenza per lo sviluppo e la competitività dei sistemi CSP – ORC.

1. Introduzione

Il primo principio della termodinamica fissa le modalità delle trasformazioni lavoro-calore e viceversa limitandosi ad affermare che in un sistema isolato, un sistema che non interagisca con l'esterno, l'energia si conserva

Alla luce del solo primo principio, però, non è possibile spiegare perché certi fenomeni, pur senza entrare in contraddizione con tale principio non si realizzano in natura.



In altre parole $L_u = Q_1 - Q_2$

Le forme di energia, quali quella di posizione, cinetica, meccanica, elettrica, di pressione, ma non l'energia termica, sono accomunate nel fatto che ciascuna di esse è integralmente trasformabile in tutte le altre, il che significa che una certa quantità, ad esempio, di energia di posizione ha lo stesso valore di una pari quantità di energia cinetica o meccanica o elettrica o di pressione in quanto è possibile comunque operare una trasformazione integrale dell'energia di posizione in una qualunque delle altre forme di energia ricordate. Si dice allora, per tale proprietà, che le forme di energia menzionate hanno carattere di *mutua sostituibilità* o anche carattere di *ordine* e vengono spesso denominate energie di *prima specie*[1].

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)
Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano
Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

“Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano”

venerdì 10 ottobre 2014

Discorso analogo-non può farsi per l'energia termica in quanto se è vero che è possibile trasformare integralmente energia elettrica o cinetica in energia termica (si pensi alle trasformazioni che hanno luogo in una stufa elettrica o durante il rallentamento di un autoveicolo) è pur vero però, che non esiste impianto, come prima ricordato, che realizzi ciclicamente una trasformazione integrale di energia termica in energia meccanica o in una qualunque delle altre forme di energia di prima specie. L'energia termica dunque non ha carattere di *mutua sostituibilità* nei confronti delle altre forme di energia né carattere di *ordine* e viene pertanto denominata energia *disordinata* o di *seconda specie*. Essa viene quindi considerata una forma di energia di qualità più scadente, ovvero degradata, in una certa misura, rispetto alle altre forme ricordate. In altre parole, una certa quantità di energia termica non ha lo stesso valore (non ha la stessa qualità) di una pari quantità ad esempio di energia di posizione o di energia cinetica in quanto queste ultime sono trasformabili integralmente in energia meccanica mentre l'energia termica realizza tale trasformazione solo in misura parziale e, come si vedrà, in misura tanto più ridotta quanto più bassa è la temperatura alla quale essa si rende disponibile. È possibile allora articolare una scala di merito per quanto riguarda le diverse forme di energia ed al primo posto di tale graduatoria compariranno, a pari merito, le forme di energia come quella di posizione, cinetica, meccanica, elettrica, di pressione che possono essere considerate della più alta qualità in quanto, essendo integralmente trasformabili l'una nell'altra, possono tutte fornire lavoro meccanico che è una delle forme di energia più necessarie alle attività dell'uomo.

2. I sistemi energetici e i limiti delle trasformazioni

E' utile introdurre, soprattutto oggi che le forme di produzione di energia derivano da potenziali diversi, il concetto di sistema energetico.

Nell'ambito dei sistemi energetici cosiddetti convenzionali, e.g. impianti con turbina a vapore (TV) ed impianti con turbina a gas (TG) l'impianto può essere riprodotto secondo una schema come sotto riportato

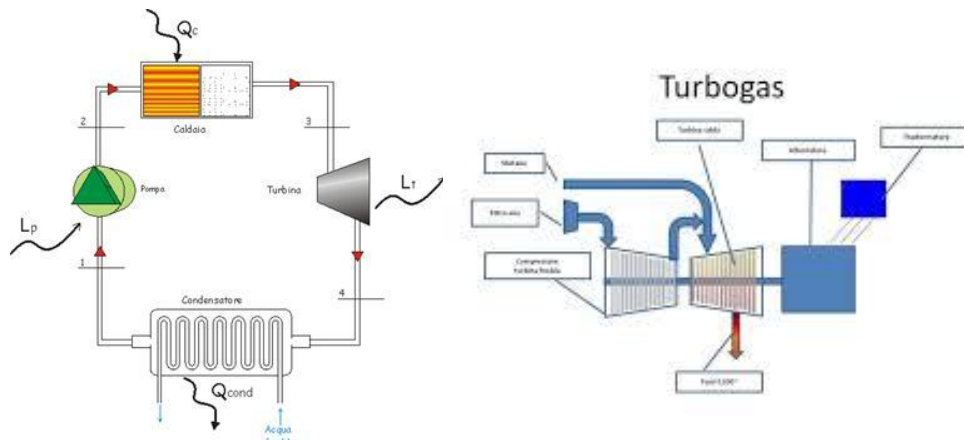


Figura 1. Ciclo Hirn e Ciclo Joule

Il rendimento globale è in questo caso facilmente definibile [2].

Il potenziale è fornito dal $P_u/\dot{m}H_i$ e cioè Potenza utile diviso il Potenza termica disponibile

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)

Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano

Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

"Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano"

venerdì 10 ottobre 2014

$$\eta_g = P_u / \dot{m}_c H_i \quad (1)$$

Questa notazione di fatto è rappresentabile in modo più esteso ipotizzando che la potenza utile per essere disponibile all'asse in termini di energia meccanica deve passare per una serie di trasformazioni.

La prima trasformazione è relativa al rilascio effettivo della potenza termica totale disponibile. Per cui la formula seguente che definisce il rendimento di trasferimento di calore, evidenzia quanta energia si possa prelevare dal potenziale messo a disposizione. Il termine $\dot{m}_c H_i$ rappresenta il prodotto tra una portata massica ed un'entalpia specifica e definisce, ad esempio, per un combustibile fossile, come già accennato, il potenziale messo a disposizione. E' ovvio che al posto del potenziale di un combustibile fossile possiamo sostituire qualsiasi tipo di potenziale. Q_1 è invece la potenza termica realmente trasferita

$$\eta_b = Q_1 / \dot{m}_c H_i \quad (2)$$

C'è poi a considerare che il fluido, ad esempio, nell'operare trasformazioni cicliche quali quelle necessarie allo sviluppo di un ciclo Rankine o Hirn o Joule può cambiare fase, come nel caso del vapore, o può cambiare la propria struttura come nel caso di una Turbo gas. Di fatto sarebbe poco ingegneristico assumere come modello un fluido a calori specifici costanti con la temperatura.

Perciò, onde avvicinarsi maggiormente alle reali condizioni di funzionamento conviene osservare che fra le imperfezioni del fluido e dell'impianto esistono differenze assai notevoli. Nel far ciò, ingegneristicamente possiamo intravedere una via intermedia considerando il fluido evolvente reale e le macchine preposte alle trasformazioni meccaniche e termodinamiche ideali.

Infatti, mentre il comportamento ideale del fluido è una ipotesi mai realizzabile, in conseguenza delle sue naturali caratteristiche fisico-chimiche sulle quali non è possibile ovviamente influire in alcun modo (si pensi alla variabilità dei calori specifici con la temperatura ed alla variabilità della specie molecolare del fluido motore per effetto della combustione nei motori a c.i.), il comportamento ideale di un impianto motore può essere ammesso, almeno in via ipotetica, se si suppone che in esso, *al limite*, si eliminino tutte le perdite. Un ciclo, può essere denominato *ciclo limite se* relativo ad una macchina perfetta in cui evolva però un fluido questa volta reale. Indicando con P_b la potenza utilmente ricavabile da tale ciclo, si può quindi definire un *rendimento limite* dato da:

$$\eta_l = P_b / Q_1 \quad (3)$$

Q_1 , è la già definita potenza termica effettivamente ricevuta dal fluido operante. Un ulteriore passo per avvicinarsi all' effettivo funzionamento dell'impianto motore si può fare considerando poi il fluido reale agente in un impianto non più al limite della perfezione, ma anch'esso reale ed affetto, quindi, da una serie di perdite inevitabili nel pratico funzionamento. In conseguenza di tali perdite la potenza P_r , realmente trasferibile dal fluido agli organi mobili della macchina sarà certamente minore di quella P_b , relativa

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)

Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano

Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

“Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano”

venerdì 10 ottobre 2014

all'ipotesi precedente di ciclo limite e quindi di impianto perfetto. Se, poi, si suppone, che la potenza termica ricevuta effettivamente dal fluido sia ancora Q_1 , il termine

$$\eta_r = P_r / P_1 \quad (4)$$

definisce un cosiddetto rendimento interno (o a volte anche specifico) che comprende tutte le perdite relative al funzionamento reale e rappresenta un indice del grado di perfezione o di bontà dell'impianto motore.

Il prodotto:

$$\eta_w = \eta_i \eta_r = (P_r / Q_1)(P_r / P_1) \quad (5)$$

Fornisce il rendimento termico reale, ovvero il rendimento del ciclo reale dato dal rapporto tra la potenza reale trasferita agli organi mobili della macchina e la potenza termica ricevuta dal fluido motore.

Per completare questa breve disamina sui rendimenti è importante introdurre il rendimento meccanico definito come:

$$\eta_m = P_u / P_r \quad (6)$$

Esso è relativo alle perdite meccaniche, ausiliari etc:

Il rendimento globale è quindi fornito dai seguenti rendimenti di specie ed indica in modo corretto i limiti di conversione da energia di seconda specie ad energia di prima specie. E' quindi possibile definire il rendimento globale come produttoria dei rendimenti sopra descritti.

$$\eta_g = \eta_b \eta_l \eta_i \eta_m \quad (7)$$

$$\eta_g = (Q_1 / \dot{m}_c H_i) (P_r / Q_1) (P_r / P_1) (P_u / P_r) = P_u / \dot{m}_c H_i \quad (8)$$

3. Analisi dei rendimenti e valutazione dei limiti in un sistema CSP-ORC

L'aver generalizzato e riassunto il funzionamento di un impianto di potenza, sia esso evolvente secondo un ciclo Joule od un ciclo Rankine ..., consente di connotare l'impianto con un termine più generale ma al contempo più logico. Parleremo di "SISTEMA ENERGETICO" in quanto "insieme di elementi coordinati tra loro in una unità funzionale; nonché, insieme delle apparecchiature e dei meccanismi predisposti per funzioni particolari".

In quest'ottica è possibile dare un peso coerente ai vari termini del rendimento, che possiamo anche chiamare funzioni di trasferimento, che portano a definire in modo specifico ogni legame che esiste tra il sistema ed il suo limite di sviluppo (termodinamica)

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)

Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano

Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

"Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano"

venerdì 10 ottobre 2014

Nel caso del CSP il sistema energetico è definito da due sottosistemi. Il sottosistema I riconducibile alla sorgente di calore (Generatore di Vapore, Camera di Combustione) e rappresentato dal circuito primario o “solare” e dal sottosistema II circuito secondario o circuito motore. Il rendimento di primo principio definito dalla (2) lo si può analizzare, in questo caso considerando che il flusso radiante solare è definibile con:

$$Q_{sr} \text{ (kW/m}^2\text{)} \quad (8)$$

E che quindi, moltiplicandolo per la superficie di raccolta A fornisce una potenza termica pari a:

$$P_{tr} = A Q_{sr} \text{ (kW)} \quad (9)$$

La relazione (2) diventa:

$$\eta_b = Q_1 / P_{tr} \quad (10)$$

E, di conseguenza

$$\eta_b = Q_1 / A Q_{sr} \quad (11)$$

Si sottolinea che questo è un rendimento di primo principio e come tale tiene conto solo della trasformazione tra potenza termica entrante e potenza termica uscente.

Se accoppiamo al sistema CSP un secondo sistema in grado di evolvere secondo un ciclo ORC quanto sinora detto sui vari tipi di rendimenti può essere trasferito ad un ciclo ORC generico.

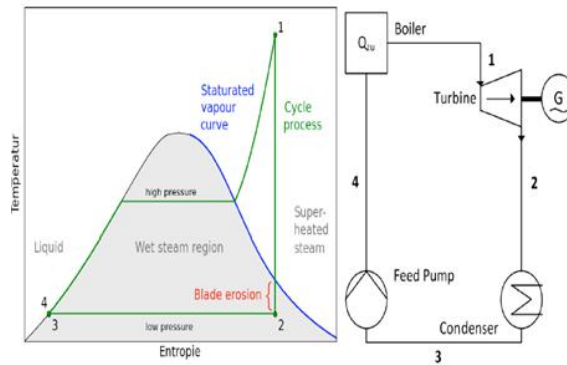


Figura 2. Ciclo Hirn e schema di impianto

Se analizziamo ora il rendimento limite vediamo che la potenza termica effettivamente recuperabile dalla sorgente termica è fortemente penalizzata dal secondo principio. Esso è legato principalmente alla considerazione che pur ipotizzando la macchina ideale, il

trasferimento di calore avviene comunque su un fluido a bassa temperatura per cui le perdite di secondo principio saranno comunque elevate.

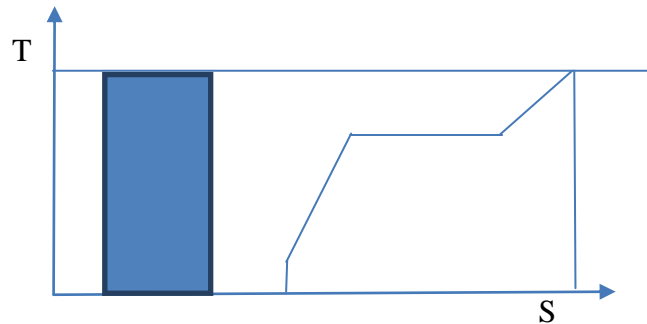


Figura 3. Ciclo di Carnot e Ciclo Hirn evolventi tra le stesse temperature T_{\max} e T_{\min}

Pur ipotizzando una macchina che al “limite” annulli le irreversibilità dovute alla viscosità, il fluido, istante per istante, varierà le sue grandezze dinamiche e termodinamiche rispetto a quelli del corrispondente punto che si otterrebbe nel caso in cui il fluido fosse ideale.

In altre parole le irreversibilità del fluido esistono anche se ciò che è più importante è che non riusciamo a fornire calore alla minima temperatura possibile in quanto il fluido cui trasferirla non la può ricevere a T_{\max} costante, mentre mediamente la può cedere a T_{\min} costante.

Se adesso consideriamo che il fluido motore riceve calore da una sorgente opportuna (in questo caso un CSP) per evolvere secondo un ciclo e indichiamo con L_r il lavoro dato dalla somma algebrica di tutti i lavori a meno delle aliquote dissipate in calore, la compressione e l'espansione, seppur perfettamente adiabatiche, non saranno isoentropiche ma saranno ad entropia crescente.

Quanto detto porta ad una serie di considerazioni che, prescindendo da una analisi dettagliata che è funzionale alla progettazione di sistemi CSP-ORC, indica alcuni concetti su cui non è possibile derogare in fase di analisi.

1. Il trasferimento di calore dalla sorgente al fluido è fortemente penalizzato dalla bassa temperatura a cui è necessario portare il fluido motore. (T di condensazione)
2. Il rendimento globale è definito dall'insieme di trasformazioni e quindi dalle macchine che attendono alle diverse trasformazioni.

Di conseguenza l'aumento del rendimento passa attraverso:

1. Innalzamento della temperatura media del fluido motore durante l'adduzione di calore dall'esterno, grazie all'inserimento di un rigeneratore

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)

Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano

Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

“Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano”

venerdì 10 ottobre 2014

2. Innalzamento della temperatura media massima di adduzione calore mediante risurriscaldamento.

3. Ipotesi di una macchina a vapore di nuova concezione per l'ottimizzazione di un sistema CSP-ORC

E' evidente come l'analisi dei rendimenti conduca ad operare una serie di scelte impostando le condizioni a cui si vuole tendere. Le relazioni di principio su esposte forniscono inoltre risposte ben precise alla strada che si deve intraprendere nella ricerca di base e nello sviluppo tecnologico.

Questo studio, in corso presso l'Università di Napoli, parte di fatto dal considerare i sistemi CSP-ORC come dei semplici sistemi termodinamici che rispondono a principi inossidabili nel tempo e che possono e devono essere migliorati utilizzando gli strumenti che la tecnologia ci mette a disposizione.

Di conseguenza ogni singolo componente deve essere pensato e sviluppato sì in un'ottica innovativa, ma mantenendo alta l'attenzione verso il rigore scientifico e considerando che l'analisi storica conduce spesso e volentieri a risultati più innovativi della mera intuizione che può portare a logiche non sempre rigorose salvo poi essere aggiustate con un forte lavoro di revisione.

L'impostazione di principio che è stata data allo studio condotto, parte comunque, da considerazioni di tipo industriale ed economico in quanto attualmente i sistemi CSP-ORC sono mortificati da un basso rendimento di conversione energetica che, in questa sede abbiamo però accertato che può essere chiamato rendimento globale. Attualmente i limiti sono attribuiti tutti a questo *numeretto* che, come visto, raccoglie scelte e tecnologie di vario tipo.

La scelta operata, nello sviluppo della ricerca di base, ha considerato il vapore come elemento primario. Inoltre ha ipotizzato il sistema energetico privo di accumulo e ha scelto come vincolo di progettazione il massimo rendimento globale acquisibile.

L'impostazione scelta ha genesi sia storiche che tecnologiche:

Storiche in quanto:

- Gli impianti a vapore hanno costituito e costituiscono ancora la spina dorsale della distribuzione di energia elettrica nel nostro paese.
- Lo studio degli impianti a vapore ha costituito e costituisce un patrimonio della nostra scuola di Ingegneria.

Tecnologiche in quanto

- L'impiantistica italiana è stata leader nel settore
- Le basi di dati e l'esperienza maturata consentono di avere riferimenti certi nello sviluppo di nuove tecnologie.

3. Il Ciclo a Vapore

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)
 Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano
 Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

“Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano”

venerdì 10 ottobre 2014

Il ciclo a vapore Hirn o Rankine surriscaldato è la base di partenza dell'impianto ad alto rendimento che si è inteso sviluppare. Partendo come sempre dalla termodinamica da essa recuperiamo una fondamentale informazione che abbiamo già definito nel paragrafo dei rendimenti ma che nell'impostazione della ricerca è bene venga ancora una volta messa in evidenza. Le irreversibilità sono legate al fluido ed alle modalità con cui esso riceve calore dalla sorgente calda. Il fornire calore ad un fluido che si trova inizialmente a bassa temperatura degrada in maniera determinante l'energia fornita. In altre parole dobbiamo innalzare la temperatura media del fluido motore.

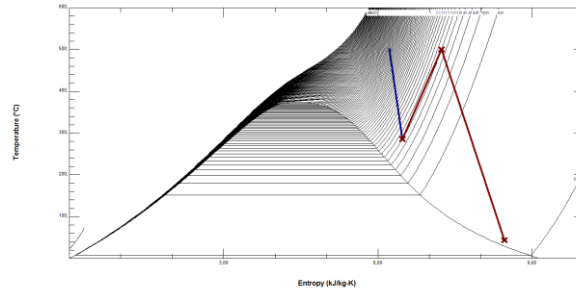


Figura 4. Innalzamento della $T_{med,max}$ mediante risurriscaldamento

E' possibile far ciò considerando due metodi direttamente derivanti dalla tecnologia degli impianti a vapore:

- Surriscaldamento
- Rigenerazione

L'impianto di riferimento passa da quello standard di fig. 5 a quello di seguito riportato in fig 6.

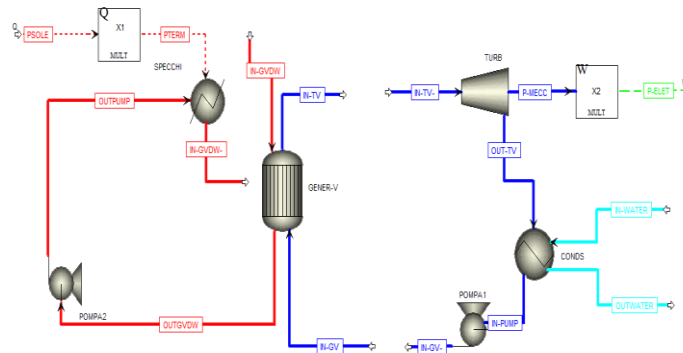


Figura 5. Impianto CSP-ORC simulatore Aspen Plus

Al fine di garantire una maggiore compattezza e semplicità costruttiva, è stata presa in considerazione una pressione di condensazione pari a 1 bar [3]. I dati di riferimento presi in considerazione sono quelli elencati di seguito.

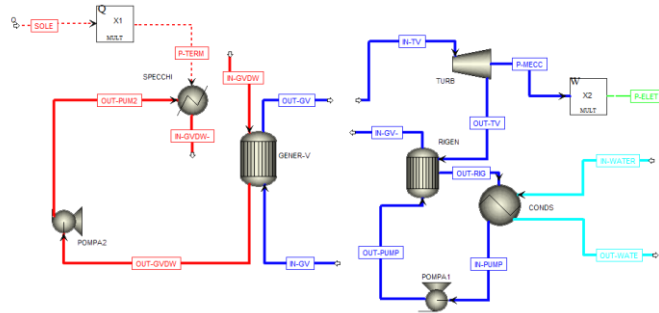


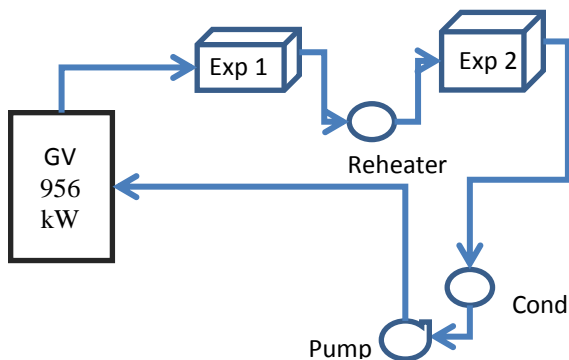
Figura 6. Impianto con rigenerazione CSP-ORC simulatore Aspen Plus

VAPORE, $maxT=500^{\circ}C$, $maxp=180\text{ bar}$, Pressione intermedia di 30 bar

Tale configurazione prevede:

- Potenza elettrica generata: 200kWe circa;
- Temperatura massima: $500^{\circ}C$;
- Pressione ingresso Primo Espansore: 180 bar;
- E' previsto un ri-surriscaldamento alla pressione di circa 30 bar;
- Espansione complessiva viene così suddivisa: da 180 a 30 bar
- Pressione di condensazione pari a 1 bar;
- Il GV sarà composto da: economizzatore, evaporatore, surriscaldatore e risurriscaldatore (ed è il componente che si interfaccia con il circuito solare);
- Portata massica di vapore circolante pari a : 0.28 kg/s
- È prevista una Rigenerazione (in funzione del rendimento)

Di seguito si riportano i due schemi a blocchi per l'impianto da 200kW con e senza rigenerazione evidenziandone sia il Rendimento globale elettrico (che ricordiamo essere il rapporto della potenza elettrica in uscita e la potenza Solare) che il rendimento dell'impianto di conversione termica (inteso come rapporto tra potenza termica scambiata nel generatore di calore e potenza Elettrica in uscita).



Dati Portata=0,28kg/Sec-
 $T_{max}=500^{\circ}$ -
 $P_{max}=180\text{ Bar}$
 Potenza Elettrica
 Totale=200 Kw Circa
 $\eta_{\text{Pompa}}=70\%$
 $\eta_{\text{Esp Alt.}}=70\%$
 $\eta_{\text{Esp G.E.}}=60\%$
 Potenza Solare= 1366kw
 Rendimento Globale
 Elettrico=15%
Rendimento
Dell'impianto=21%

Figura 7 Schema ciclo con risurriscaldamento

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)
 Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano
 Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

“Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano”

venerdì 10 ottobre 2014

Nel caso senza rigenerazione si è individuata una potenza termica scambiata nel generatore di vapore pari a 956,28 kW termici. La potenza solare è il rapporto tra questa potenza termica e l'efficienza degli specchi ritenuta essere pari al 70%. Quindi, a valle di questo calcolo otteniamo una potenza Solare di 1366,11kW (per una superficie circa uguale a 1517 m²) che, confrontata con la potenza elettrica in uscita, restituisce un valore del rendimento globale elettrico pari a 15%[4]. Per quanto concerne invece il Rendimento dell'impianto di conversione termica si ha un valore del **21%**.

Per questa nuova configurazione che mostra interessanti risultati teorici si presentano nello specifico tutti i risultati, ritenendo la configurazione 3 in esame, quella che può avere i più ampi margini di sviluppo.

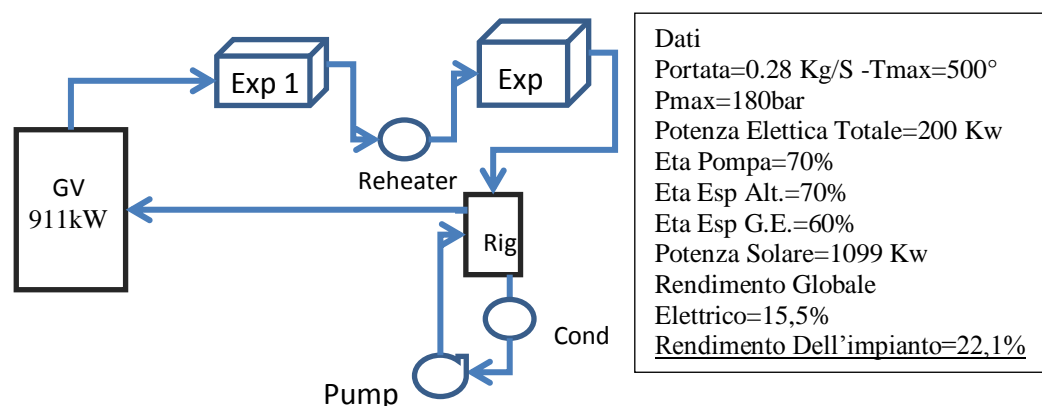


Figura 8. Schema di impianto con risurriscaldamento e rigenerazione

(kg/sec)	Tmax (°C)	Pmax (bar)	Pmin (bar)	Tmin (°C)	η_{exp}	P _{el} (kW)
PRIMA ESPANSIONE (180-30 bar)						
0,255	500	180	30	270	0,7	71
SECONDA ESPANSIONE (30 0,5 bar)						
0,255	500	30	0,5	206	0,6	129
POTENZA ELETTRICA GLOBALE						200

Tabella 1 Parametri termodinamici delle simulazioni effettuate

POTENZA TERMICA

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)
Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano
Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

“Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano”

venerdì 10 ottobre 2014

GV + Riscaldatore	842 kW
$P_{sun} = (GV + Riscaldatore) / 0.7$	1203 kW

Tabella 2 Potenza termica necessaria per attivare il ciclo termodinamico con riscaldamento

RENDIMENTI	
RENDIMENTO GLOBALE ELETTRICO	$P_{el}/P_{sun}=16,6\%$
RENDIMENTO DELL'IMPIANTO DI CONVERSIONE DELL'ENERGIA	$P_{el}/P_{GV+Risurr.}=23,7\%$

Tabella 3 risultati delle simulazioni in termini di rendimenti

3. Conclusioni

I dati riportati sono frutto di una attenta analisi termodinamica. Essi sono estrapolabili per qualsiasi impianto che produca energia meccanica (elettrica) evolvendo lungo un ciclo termodinamico. Questo vuol dire che l'analisi può essere ricondotta ad altri fluidi organici.

La teoria sviluppata secondo l'adozione dei soli rendimenti è fortemente in accordo con i risultati trovati nell'impianto preso come riferimento e fa chiarezza sui limiti che esistono nello sviluppo degli impianti CSP-ORC[5].

La comparazione tra il ciclo non rigenerato ed il ciclo rigenerato, ad esempio, aiuta nella lettura dei limiti termodinamici cui un sistema CSP-ORC è soggetto e definisce i margini su cui poter operare per migliorare tali sistemi[6].

Risalta subito come i due rendimenti termici siano diversi tra loro ma molto vicini: 22,1% per l'impianto con rigenerazione e 21% per quello senza rigenerazione. Ciò vuol dire che si è vicini al limite possibile di innalzamento della $T_{med, max}$ già aumentata mediante riscaldamento per cui il rigeneratore può essere considerato come un componente superfluo. In altre parole si è giunti al limite del trasferimento termico.

Definite queste condizioni, fortemente dipendenti dalla sorgente, in questo caso il sistema CSP, si vede come i margini di aumento di rendimento, solo dopo aver spinto al limite rigenerazione e riscaldamento, sono legati alla progettazione delle macchine, siano esse espansori o compressori. Questo ragionamento è ben evidenziato dal diagramma sottostante. In esso sulle ascisse sono rappresentati i rendimenti dell'espansore ed in ordinate il rendimento globale dell'intero impianto CSP-ORC. Le rette colorate rappresentano invece l'efficienza con cui gli specchi sono in grado di convertire la radiazione solare. Dal diagramma si evince che l'apporto all'aumento del rendimento globale elettrico della sola macchina dipende fortemente da come si è in grado di trasferire il calore dalla sorgente (Energia Solare) al fluido motore.

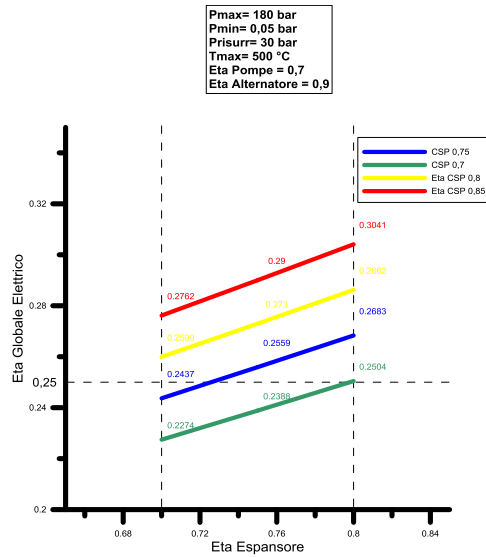


Figura 9 – Correlazione fra il rendimento globale dell’impianto solare termodinamico CSP con il componente di produzione di energia meccanica

Questa impostazione è in pieno accordo con la trattazione effettuata. Di fatti il rendimento unitario della macchina motrice non risolve assolutamente i limiti dell’impianto che sono fortemente regolati da ciò che inizialmente abbiamo chiamato rendimento limite. A questo punto potrebbe sembrare marginale la scelta della macchina, in realtà essa consente di recuperare un importante contributo all’efficienza di questa tecnologia.

Il limite reale del rendimento globale elettrico, da noi fissato nel 25%, è indicato dalla linea tratteggiata. Questo valore è stato da noi considerato in quanto riteniamo che darebbe ai sistemi CSP alta competitività sul mercato delle rinnovabili.

Dalla **Error! Reference source not found.** si riscontra come con un’efficienza degli specchi di 0.75 è necessario almeno un rendimento adiabatico dell’espansore superiore a 0.72. In base ai dati di letteratura con le migliori tecnologie attuali si può ottenere finanche un rendimento massimo di 0.8. con una spesa difficili da sostenere sull’ attuale mercato. E’ ben noto, tra l’altro, che esiste un *trade-off* tra il costo e l’efficienza.

Bibliografia

- [1] R. della Volpe “Macchine” 2002 - Liguori Editore
- [2] O. Vocca “ Lezioni di Macchine” Liguori editore
- [3] A.Amoresano, F.fFerrara, A. Gimelli, G.Langella A.Luongo, “*CSP Power Plant: Thermodynamic Analisys and Comparison Between ORC and Steam Solutions*” ATI Conference – Bologna 2013)
- [4] A. Amoresano, P De Sio, A Gimelli, G Langella, S Meo “*Grid Connected CSP-ORC Plants for Residential Application.*” – Vol 6(5) pp 1468-1476 International Review on Modelling & Simulations, 2013

- [5] A.Amoresano, G.Langella, S.Meo “Cycle efficiency optimization for ORC solar plants” Vol.7 (5) pp. 888-894 International Review of Mechanical Engineering 2013
- [6] Wolpert JL, Riffat SB. Solar-powered Rankine system for domestic applications. *Appl Therm Eng* 1996;16:281–9.